

福井大学平成22年度重点研究「競争的配分経費（若手研究者支援）」

## 内・外圧および軸・ねじり複合多軸疲労試験装置の開発 (圧力容器・配管等の実機を模擬した広域な多軸負荷状態での疲労試験装置開発の挑戦)

研究代表者：伊藤 隆基（工学研究科・准教授）

概 要	機械構造用材料の多軸低サイクル疲労寿命は、主応力・主ひずみ軸方向が時間的に変化する非比例負荷を受けると応力増加を伴って著しく低下し、それは負荷経路や材料に依存することが報告されている。これらの報告は、いずれも薄肉円筒試験片に軸とねじりの負荷を付与する多軸疲労試験装置を用いて得られた結果に基づいて検討されたものである。しかしながら、この試験方法で試験が可能な多軸負荷状態の範囲は、主ひずみ比 $\varepsilon_1/\varepsilon_3$ が $-1 \leq \varepsilon_1/\varepsilon_3 \leq -\nu$ （ $\nu$ ：ポアソン比）に限られてしまい、より広い範囲の多軸負荷状態の試験を実施するには特別な試験装置を必要とする。そこで、広域な多軸負荷状態で非比例負荷の試験を実施する内外圧・軸・ねじり多軸疲労試験装置および等二軸疲労試験装置を設計・開発した。
関連キーワード	試験装置開発、材料試験、強度評価、金属疲労強度、多軸負荷

### 研究の背景および目的

原子力圧力容器やガスタービン等使用される実構造物では熱応力と機械的応力の重畳により主応力・主ひずみ軸方向が時間的に変化する非比例負荷を受け、負荷経路によっては破損寿命が大幅に低下することがある。高速増殖原型炉もんじゅも同様に低圧高温状態になるため、同様な非比例負荷を受けることが予想される。

機械構造用材料の多軸低サイクル疲労寿命は、非比例負荷を受けると応力増加を伴って著しく低下し、それは負荷経路や材料に依存することが報告されている。これらの報告は、いずれも薄肉円筒試験片に軸とねじりの負荷を付与する多軸疲労試験装置を用いて得られた結果に基づいて検討されたものである。しかしながら、この試験方法で試験が可能な多軸負荷状態の範囲は、主ひずみ比 $\varepsilon_1/\varepsilon_3$ が $-1 \leq \varepsilon_1/\varepsilon_3 \leq -\nu$ （ $\nu$ ：ポアソン比）に限られてし

まう。なお、ここにおける $\varepsilon_1$ は最大主ひずみ、 $\varepsilon_3$ は最小主ひずみを示す。しかし、もんじゅを始めとした実構造物ではより広範囲の多軸負荷状態、たとえば平面応力状態の全主ひずみ比の範囲（ $-1 \leq \varepsilon_1/\varepsilon_3 \leq +1$ ）の負荷を受ける可能性がある。広域な多軸負荷下における試験を実施するには特別な試験装置を必要とするが、このような試験装置は過去に開発の経緯は見られるものの、試験装置の構造や技術的な数々の問題が障害となり具体的な成果の創出には至っていない。

そこで本研究では従来とは異なる手法や多軸疲労に関する豊富な経験を以って広域な多軸負荷状態で非比例負荷の試験を実施するために必要な内外圧・軸・ねじり多軸疲労試験装置および等二軸疲労試験装置を設計・開発した。

### 研究の内容および成果

発電用プラントや化学プラントでは、多数の金属製配管が複雑な形状をして張りめぐらされ、それぞれの機能を果たしている。配管は、内部流体の移動による機械的負荷や流体の温度変化による熱負荷等を受け、複雑な応力状態（多軸応力）で使用されている。プラント設計時には、用いる材料の寿命設計および評価が不可欠であり、疲労寿命等さまざまな基礎的データが各研究機関で蓄積されている。

図1は金属材料の疲労試験の様式のイメージである。(a)はもっとも一般的に実施される、引張・圧縮の単軸疲労試験である。比較的簡便な実験方法であるが、実機で問題となる複雑な応力状態（多軸応力）を模擬できないという問題がある。多軸応力状態での疲労試験を実施するために、(b)に示すような引張・圧縮－ねじりの装置を用いた報告

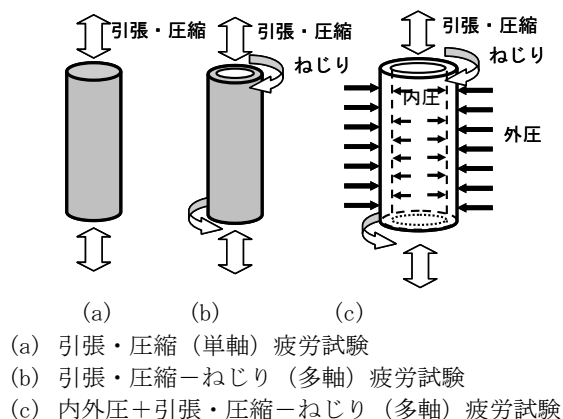


図1. 単軸および多軸疲労試験

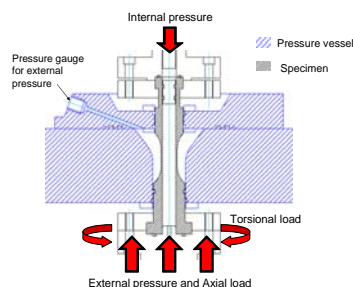


図 2. 内外圧・軸・ねじり多軸疲労試験装置の試験装置構造概略図

例もある。単軸応力状態(a)と多軸応力状態(b)とでは寿命に差が生じるという試験結果は、より実機に近い状態での実験力学的検証が必要であることを示唆している。(c)は、配管の実際の使用状態を考慮して、内圧および外圧が負荷された状態での、引張・圧縮・ねじりの多軸疲労試験であるが、汎用試験装置としては市場では見られず、未だ解明されていない分野である。

本研究の目的は、新しいタイプの試験装置を開発することであり、この(c)が、開発しようとする試験装置のモデルである。本研究で取り組もうとしているのは疲労強度研究の未解明の分野であり、独創性および新規性を大いに有している。本研究から得られる知見は産業界（とくに電力・重工業）に直ちにフィードバックできるものであり、その貢献の度合いも大きい。また、開発した試験装置を用いて、プラント配管の寿命に及ぼす外圧・内

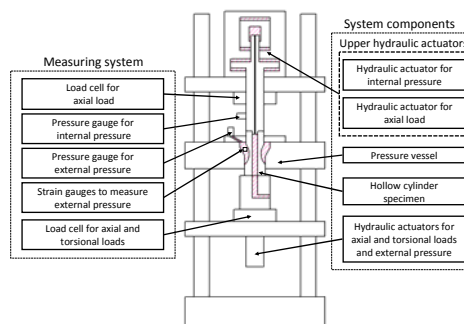


図 3. 内外圧・軸・ねじり多軸疲労試験装置概観

圧・多軸応力状態の影響について定量的に解明できる道を開くことができる。

開発した試験装置は、図 2 に示すように薄肉円筒試験片に対して軸・ねじり負荷に加えて内外圧繰返し負荷を付与することで、内外圧負荷を付与しない場合に比べて広域な多軸負荷状態で非比例負荷が重畳した平面応力状態の疲労試験が可能となる。試験装置の構造は図 3 に示すように試験装置は内圧負荷シリンダ、外圧負荷用圧力容器、軸・ねじりアクチュエータの 3 つの部品から構成されており非常に複雑な機構を有している。内圧負荷シリンダおよび軸・ねじりアクチュエータのシリンダ動作を制御プログラムで調整することにより、内外圧、軸およびねじり負荷を試験片に与える。試験荷重の各目標値は内圧および外圧は 200MPa、軸荷重は 5t、ねじり荷重は 500N・m とした。なお、本試験装置は特許申請予定のため、詳述は割愛する。

## 本助成による主な発表論文等、特記事項および競争的資金・研究助成への申請・獲得状況

### 「主な発表論文等」

Takamoto Itoh and Tao Yang, “Multiaxial Low Cycle Fatigue Life Evaluation of Different Materials under Non-proportional Loading”, JSME, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.4, No.10 (2010), pp.1520–1529.

Yuhui Huang, Fu-Zhen Xuan, Shan-Tung Tu, Takamoto Itoh, “Effects of Hydrogen and Surface Dislocation on Active Dissolution of Deformed 304 Austenitic Stainless Steel in Acid Chloride Solution”, Materials Science and Engineering: A, Vol.528, No.3 (2011) 1882–1888.

伊藤隆基, 坂根政男, 尾崎智彦, “多軸応力下でのひずみおよび応力範囲の定義法（比例および非比例負荷）”, 材料（高温特集号）, Vol.60, No.2 (2011), pp.88–93.

Takamoto Itoh and Tao Yang, “Material Dependence of Multiaxial Low Cycle Fatigue Lives under Non-Proportional Loading”, International Journal of Fatigue, Vol.33, (2011) (Special Issue: Multiaxial Fatigue Models, 掲載決定).

### 「特記事項」

#### （受賞）

材料学会高温強度部門委員会貢献賞, 2010 年 12 月

### （特許）

「多軸疲労寿命評価方法及び装置」, 2010 年 9 月 9 日出願（特願 2010-201931）

「内外圧・軸・ねじり多軸疲労試験装置」, 2011 年 3 月（出願予定）

「軸・回転多軸油圧シリンダー」2011 年 3 月（〃）

### 「競争的資金・研究助成への申請・獲得状況」

#### （受託研究）

“軽水炉機器・構造物の繰返し複合荷重下における破壊評価に関する研究”, 原子力研究委員会 MDF 小委員会（日本溶接協会）

“熱疲労荷重に対する疲労損傷評価の高度化のための研究”, 高経年化対策強化基盤整備事業（技術情報基盤の整備等）（三菱総合研究所）

“F82H-BA07 材の基礎的な材料および強度特性評価に関する研究”, 幅広いアプローチ活動における原型炉 R&D の係る共同研究（日本原子力研究開発機構）

#### （共同研究）

“非比例多軸変動負荷における疲労寿命評価手法の検討”, 株式会社 I H I 技術開発本部 基盤技術研究